

次世代放射光施設利用研究検討委員会 WG 報告書

ビームライン名 磁性・スピントロニクス材料科学ビームライン

WG 構成メンバー 木村 昭夫 (広島大、主査)、雨宮 健太 (KEK)、小林 正起 (東京大)、桜庭 裕弥 (NIMS)、澤田 正博 (広島大)、武市 泰男 (KEK)、中尾 裕則 (KEK)、松田 巖 (東京大)、水口 将輝 (東北大)、三輪 真嗣 (東京大)、山崎 裕一 (NIMS)、和達 大樹 (兵庫県立大)、綿貫 徹 (量研)、上野 哲朗 (量研)、境 誠司 (量研)

概要 (500 字程度) (※全体の概要を記載ください)

磁性・スピントロニクス分野において、材料やデバイスは多元素化や多積層化の方向に進んでおり、それに応じて、各元素やレイヤーを分離して計測できる元素選択的な軟 X 線分光の重要性はますます高まる。特に、次世代高輝度光源はデバイスの微細化・高速化が進む中、ナノスケールの実デバイスサイズでの計測および高速なダイナミクス計測に威力を発揮するため、本ビームラインでは時間・空間・元素分解スピンドイナミクス研究を主要な目標に掲げる。さらに、デバイスに应用される材料が、これまでの強磁性体から反強磁性体や低次元磁性体へ、金属から低次元系などの量子物質や絶縁体へと拡大しているため、XMCD から XMLD・XLD によるスピン・軌道分極分光への拡張による新規物質・材料研究も主要目標とする。

これを達成するために、ダイナミクス計測・オペランド計測、ナノイメージング、ハイスループット計測、超高真空下 in situ 計測の各要素を整備するほか、ダイナミクス計測とナノイメージングとを融合させて、放射光の限界である数 10 ps・数 nm の時間・空間の最

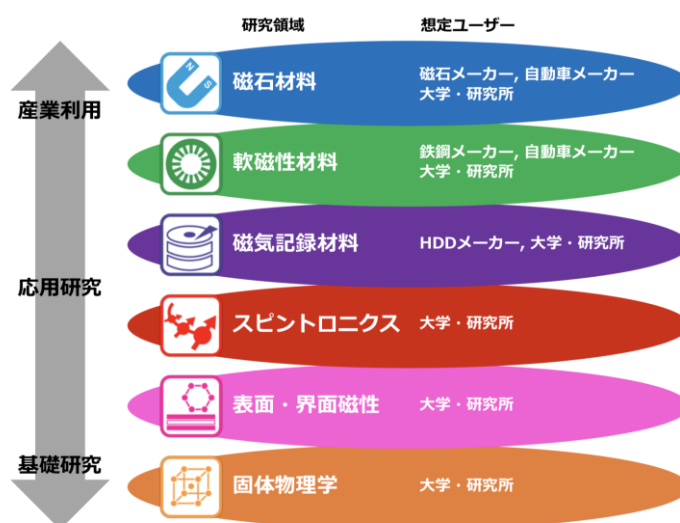


図 1. 本ビームラインがカバーする磁性・スピントロニクス材料科学分野。

高分解能の両立を実現させる。また、これら全般を高度に実施するために、分割型 APPLE-II アンジュレータを導入する。高精度 XMCD・XMLD・XLD 計測を実現するのみならず、高速偏光切替による高速リアルタイム磁気イメージングや偏光を連続回転させた新しい分光法を可能とするものであり、本 BL を『世界一“多彩な偏光制御”が可能なナノスケール観察用の分光 BL』とする。

1. ターゲットとする研究開発

1-1 主な研究目標と計測技術目標

磁性・スピントロニクス分野において、材料やデバイスは多元素化や多積層化の方向に進んでおり、それに応じて、各元素やレイヤーを分離して計測できる元素選択的な軟 X 線分光の重要性はますます高まる。また、デバイスの微細化・高速化が進む中、次世代放射光はその高輝度性により、ナノスケールの実デバイスサイズでの計測および高速なダイナミクス計測に威力を発揮する。さらに、デバイスに應用される材料が、これまでの強磁性体から反強磁性体や低次元磁性体へ、金属から低次元系などの量子物質や絶縁体へと拡大する中、材料研究においてもエッジ等の微細領域の計測が必要となるとともに、軟 X 線吸収分光手法として、強磁性を計測する X 線磁気円二色性 (XMCD) から、反強磁性体及び低次元物質等の量子物質・材料に対応する X 線磁気線二色性 (XMLD)・X 線線二色性 (XLD) への拡張が求められている。

そこで、本 BL では、主な研究目標として、以下の①及び②を掲げる。

- ① スピントロニクス分野を中心とした時間・空間・元素分解スピンドイナミクス研究
- ② XMCD から XMLD・XLD によるスピン・軌道分極分光への拡張による新規磁性物質・材料研究

利用分野としては、磁性・スピントロニクス研究分野の基礎から応用までの幅広い分野（「固体物理」、「表面・界面磁性」、「スピントロニクス」、「磁気記録材料」、「軟磁性材料」、「磁石材料」の各分野）をカバーし、研究開発段階に応じて、材料探索からデバイス開発・高性能化のための解析をワンストップで実施できる BL を目標とする（図 1）。これを達成するために、主な計測技術目標として、

- ・ デバイスが実際に動作する環境下でのダイナミクス計測・オペランド計測
- ・ デバイスの微細化に対応するナノイメージングおよびダイナミクス計測との融合
- ・ マテリアル・ライブラリに対応するハイスループット計測
- ・ 高度な試料作製と超高真空下でのその場測定が一貫して行える in situ 計測

を設定する。また、これら全般を高度に実施するために、本 BL では分割型 APPLE-II アンジュレータを導入する。これにより、世界の軟 X 線磁気分光 BL の中でも特徴的な『分割型 APPLE-II アンジュレータを用いた、世界一“多彩な偏光制御”が可能なナノスケール観察用の分光 BL』を構築する。“多彩な偏光制御”とは、左右の円偏光および水平・垂直偏光の発生に加えて、100 Hz に至る高速偏光切替、および、その切替を自由なモード（サイン波、矩形波、三角波、など）および自由な周波数で行い、直線偏光の回転も可能とするものである。高速偏光切替による高速磁気イメージングや偏光を連続回転させた新しい分光法などの新技術が可能となる。さらに、偏光切替によってもビーム位置変化がないという特長を持つため、ナノスケールの空間分解能での XMCD・XMLD・XLD 分光イメージングや、界面部分のみの観察など、高精度の空間分解能の計測が益々求められる今後に極めて有効なツールとなる。また、分割型 APPLE-II アンジュレータの導入により、軟 X 線領域のみならず、テnder領域での左右円偏光発生およびその切替が可能となり、世界に類を見ない同領域の XMCD や自然円二色性(NCD)など各種円二色性計測が実現できる。

1-2 研究目的、研究内容

1-2-1 スピントロニクス分野を中心とした時間・空間・元素分解スピンドイナミクス研究

応用分野では、スピントロニクスデバイスの機能発現メカニズムを理解し性能を向上させるために、実デバイスサイズ、且つ、実動作速度におけるスピンドイナミクス解明が求められているほか、機能発現に大きく寄与する界面での外場制御時のスピン応答解明などが求められている。基礎分野では、スピン流の発生・伝播メカニズムの解明や、トポロジカルなスピン状態の構造・ダイナミクス解明などが重要なテーマであり、これらの研究を推進する。具体的な研究例を以下に挙げる。

- ・ **スピントルク発振子などの 100 nm 程度以下の素子について、 GHz 領域の実動作速度における元素ごとの超高速スピン動作の解明**

スピントロニクスデバイスにおけるスピン流と磁性体中の磁化の歳差運動を利用した非線形効果である「スピントルク発振」により、直流電流から交流電圧を得ることできる。例えば、磁気緩和（ダンピング）がスピンの歳差角を決めるため、発振強度にも直接寄与することが分かっている。そのため、どの元素のスピンがどの程度の磁気緩和を有しているのかを知ることは、超高速スピンの動作解明に資する。また、最近ではスピントルク発振の非線形性が脳内神経回路を模倣したニューロモルフィックコンピューティングに使えるとも考えられている [J. Torrejon *et al.*, *Nature*, 428 (2017)] (図 2 上)。本 BL では、微小素子内における GHz 帯の動作環境での元素毎のスピン動作を直接観測することにより、これらのスピン動作機構の解明を目指す。

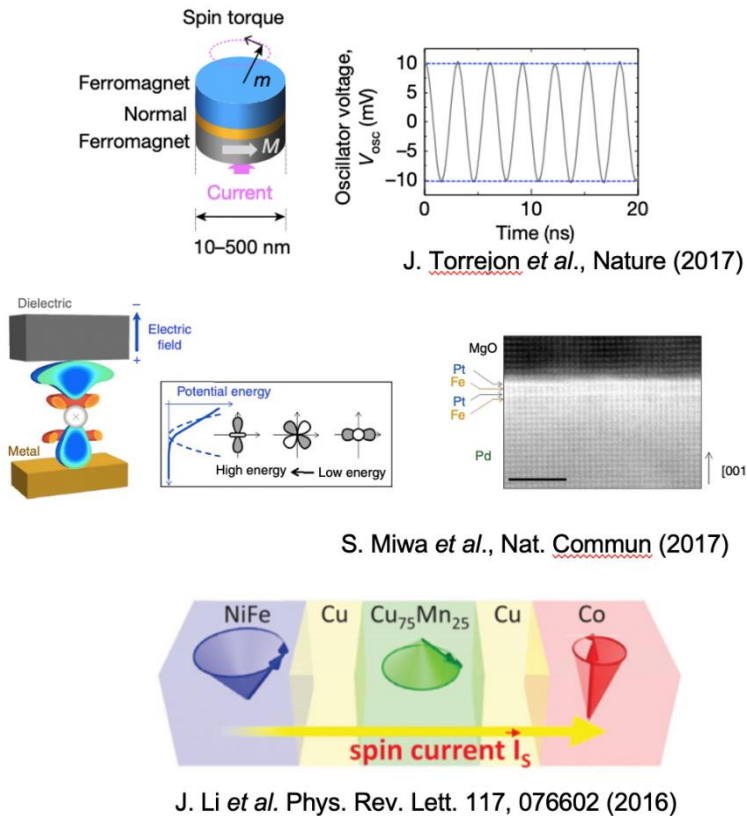


図 2. 研究ターゲット 1。

- 次世代電界制御素子についての、ナノスケールの実デバイスサイズにおける界面スピン・軌道の外場応答の解明

最近、サブナノ秒の電圧パルスによる磁化反転の制御を利用する「電圧制御不揮発性磁気メモリ素子」が従来の電流駆動型に比べ、高速動作が可能で大幅な低消費電力が可能な素子として大きな注目を集めている。電圧効果は素子界面が大きな役割を担い、スピンだけでなく軌道が大きく関与していると考えられている [S. Miwa *et al.*, Nat. Commun. **8**, 15848 (2017)] (図 2 中)。但し、現状の放射光施設では実デバイスよりも大きな試料を用いる必要があり、更に膨大な測定時間が必要である。従って解析に必要な詳細外場応答データを取得できていない。本 BL では、高輝度性能を活かしてナノスケールの実デバイスサイズの試料に対して高精度・高速計測を実現させることにより現状の課題を克服し、メカニズム解明を通じて次世代素子開発を促進する。

- マルチレイヤー間のスピン流伝播について、例えば、強磁性層・非磁性層接合界面における強磁性層から非磁性層へのスピン流注入の直接観測による伝播メカニズムの解明

スピン流の生成、観測、制御はスピントロニクス分野における中心的なテーマの 1 つである。X 線強磁性共鳴 (XFMR) 法は AC スピン流を直接計測する手法として注目されている [J. Li *et al.*, Phys. Rev. Lett. **117**, 076602 (2016)] (図 2 下)。XFMR 法を用い

て強磁性層・非磁性層接合界面における強磁性層から非磁性層へのスピンの注入、非磁性層における伝搬メカニズムを解明する。さらに熱とスピンの相関現象を取り扱うスピントロニクスへの応用に向けて、熱-スピン変換によるスピンの生成とその元素選択的ダイナミクスの解明を行う。

- ・ スキルミオンやその他新奇トポロジカルスピン状態の構造・ダイナミクス解明

磁気スキルミオンに代表されるトポロジカルな特性を有する磁気構造は外乱要因に対して安定な構造を有しており、電場や電流などの外場によって制御が可能である。磁気構造の空間構造・ダイナミクスを観測することは、トポロジカル磁気構造体の基礎学理を解明していく上でも、またスピントロニクスデバイスなどへと応用展開する上でも重要な研究手法となる。分割型 APPLE-II アンジュレータを用いた高速磁気イメージングにより、例えば、磁気スキルミオン格子について現状で1s程度で観測されている磁場に対する非自明なカイネティクス[Y. Yamasaki *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 220421 (2015)]が、10 msecに至るまでの時間分解能での観察できるようになることが期待されるほか、磁気スキルミオンのナノスケールの内部構造の GHz 帯でのダイナミクス[M. Mochizuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 017601 (2012)]の解明も期待される。最近では、ホプフィオンなどスキルミオン以外の新奇トポロジカルスピン状態も提唱されており[Paul Sutcliffe, arXiv:1806.06458v2 (2018)]、それらの構造・ダイナミクス解明に本BLは有効である。また、それらを通じて、トポロジカルなスピン状態のダイナミクスを介したバルク・エッジ対応の理解の深化を促進するものとなる。

1-2-2 XMCD から XMLD・XLD によるスピン・多極子分光への拡張による新規磁性材料・物質研究

XMCD から XMLD・XLD によるスピン・軌道分極分光へ拡張し、物質系を、強磁性体に加えて反強磁性体や低次元磁性体へ、金属に加えて二次元系物質やトポロジカル材料などの量子物質や絶縁体に展開する(図3下)。また、スピントロニクスに加えてスピンオービトロニクスへの展開と、それをもたらす新しい分光法を開拓する。具体的な研究例を以下に挙げる。

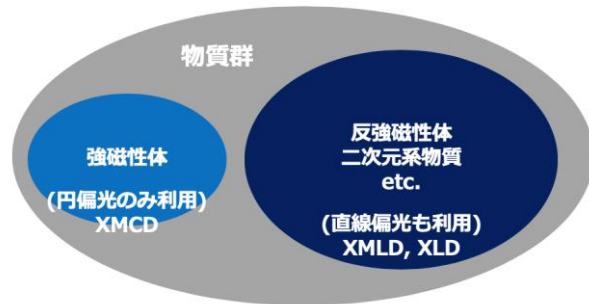
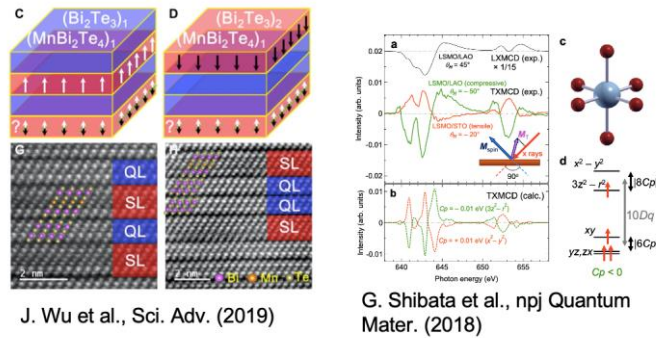


図 3. 研究ターゲット 2。

- 新規磁石材料、および、反強磁性体・ハーフメタルなど新規デバイス材料の多元素探索条件空間における創成・探索

化学組成を傾斜したコンビナトリアル薄膜や不均質バルク物質などのマテリアル・ライブラリを試料とするハイスループット計測による高速物性評価は、マテリアルズインフォマティクスのようにビッグデータを必要とする最近の物質探索、材料開発に欠かせない技術となっている [I. Takeuchi *et al.*, Nat. Mater. **2**, 180 (2003), Y. Iwasaki *et al.*, npj Comput. Mater. **3**, 4 (2017)]。放射光を用いたハイスループット計測としてはコンビナトリアル試料のハイスループット X 線回折が実用化されている [J. M. Gregoire *et al.*, J. Synchrotron Rad. **21**, 1262 (2014)]。本 BL ではハイスループット XMCD 分光計測及びハイスループット XMLD 分光計測によって、スピン・軌道磁気モーメントの高速マッピングや反強磁性物質の高速探索が可能となる。これによって所望の磁気物性をもつ物質を迅速に発見することが可能となり、スピントロニクスデバイス等への実装による高機能化を実現する。

- 磁性トポロジカル物質や 2 次元物質（グラフェン、2 次元 van der Waals 物質）などの新規物性解明

散逸のないカイラルエッジ電流を伴う量子異常ホール効果を示す磁性トポロジカル物質が注目を集めている [J. Wu *et al.*, Sci. Adv. (2019)] (図 3 左上)。現状では、異常ホール効果の実現する温度が極低温に限定されている。無散逸なエッジ電流をスピントロニクスに応用するためには、室温で量子異常ホール効果を示す、より安定な強磁性

または反強磁性トポロジカル物質の開発が必要であり、そのためには XMCD だけでなく XMLD を用いた磁性トポロジカル物質やトポロジカル物質と他磁性物質との磁気ヘテロ構造のスピンの軌道分極分光が強く望まれる。

グラフェンや遷移金属カルコゲナイドなど 2 次元物質 van der Waals 物質についても、卓越したスピン輸送性に基づく磁気メモリ等への応用に加えて、最近では、強磁性・反強磁性や垂直磁気異方性、高い電流-スピン流変換効率、磁気応答性を示す単一光子源の発見など、電子スピンの効率的制御や電流・光-スピン変換に有望な新規物性が相次いで報告されており、今後、スピン・軌道分極分光による発現機構の解明やオペランド実験による特性制御の研究が進むことで、ロジックインメモリやスピントロニクスデバイスなど革新的な集積型スピントロニクスデバイスの実現に繋がることを期待できる。

- ・ **垂直磁気異方性における軌道状態の役割など、デバイス界面における軌道効果の解明**

磁性薄膜における垂直磁気異方性の起源のように、界面における軌道状態の観測と制御はスピントロニクスデバイスの高機能化に不可欠である。最近、角度分解 XMCD 分光測定によって T_z 項と呼ばれる磁気双極子演算子を分離観測することが可能になり、その異方性が議論されている [G. Shibata *et al.*, npj Quantum Mater. **3**, 3 (2018)] (図 3 右上)。また XMLD 分光測定によって電荷分布の異方性もわかるようになってきた [G. Shibata *et al.*, J. Jpn. Soc. Phys. **87**, 114713 (2018)]。高輝度性や分割型 APPLE-II アンジュレータによる高速偏光切替を活用して、これらの分光測定を超高精度で行い、更には、面内の空間分布も観察することで、界面における異方的な軌道状態の精密解析が著しく進捗し、その役割が明らかになることが期待される。

1-2-3 分割型 APPLE-II アンジュレータの導入により特に発展する研究テーマ

分割型 APPLE-II アンジュレータ (図 4 左上) によって可能となる主な計測技術とそれに対応する研究テーマを以下に示す。

- ・ **高速リアルタイム磁気イメージング**

左右の円偏光、或いは、水平・垂直の偏光切替を矩形波モードで行い、Coherent Diffraction Imaging (CDI) と組み合わせることにより、繰返し積算計測を要しない 10 msec の時間分解能に至る高速リアルタイム磁気イメージングが可能となる。1-2-1 記載のスキルミオン格子などのトポロジカルスピン状態のダイナミクス観察に有効である。特に、スキルミオン格子については、周期平均構造を反映するブラッグ反射の観測では分からない、ドメイン状態のダイナミクス解明が期待される。

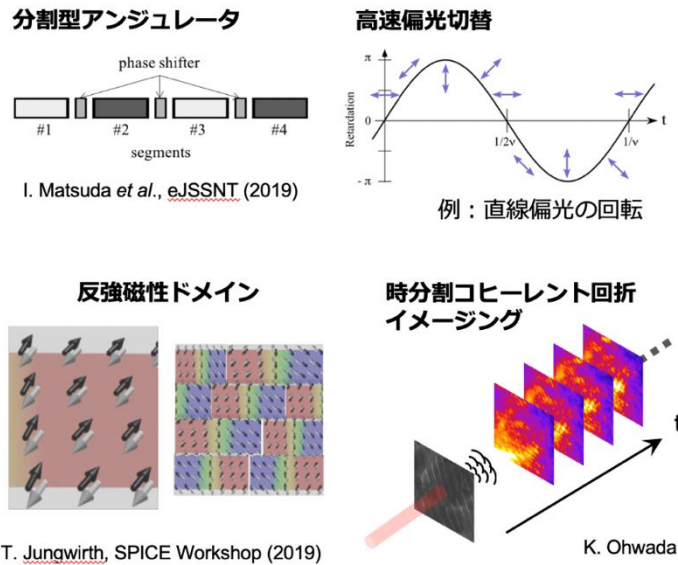


図 4. 研究ターゲット 3。

- XMCD・XMLD・XLD による高速マッピング測定

1-2-2 記載のマテリアル・ライブラリの高速物性評価に効果的である。また、偏光切替によってもビーム位置変化がないという特長を持つため、ナノスケールの観察領域でも高精度、且つ、高速のマッピング測定ができる。例えば、従来法では困難であった反強磁性体薄膜の各ドメインの磁性の評価も XMLD マッピング測定で可能となる。最近では、反強磁性体のドメインをデバイスに利用することも提案されており [P. Wadley *et al.*, Nat. Nanotech. **13**, 362 (2018) , T. Jungwirth, SPICE Workshop (2019)] (図 4 左下)、このような研究の促進にも有効である。

- 超高精度オペランド計測

100 Hz に至るまでの領域で偏光切替周波数を自由に制御できるため、ロックイン計測により、各種ドリフトの影響を排除した超高精度オペランド計測が可能となる。

1-2-1 記載の次世代電界制御素子の研究に極めて有効である。XMCD だけでなく XMLD・XLD も可能であるため、強磁性体だけでなく反強磁性体や分子磁性体における軌道の外場応答計測にも適用できる。

- 直線偏光を連続的に回転させて分光を行う Rotational MLD などの新しい分光法の構築

直線偏光の連続回転により (図 4 右上)、軌道方位の解析やドメイン同士の軌道方位関係など、多様な軌道に関する情報が得られると期待される。

・ テンダー領域の X 線を用いた円二色性計測

分割型 APPLE-II アンジュレータでは、直線偏光の高次光を組合せることにより、軟 X 線より高エネルギー領域における、左右円偏光切替による XMCD や NCD など各種円二色性計測が可能となる。本 BL のエネルギー上限は 3 keV に設定しているが、所謂、テンダー領域 (2–4 keV 程度) において、ダイヤモンド移相子が利用できない 3.1 keV 以下で左右円偏光発生およびその切替を可能とする光源を有する施設は世界にも存在しないため、大きな特長となる。

磁性・スピントロニクス分野での研究展開としては、例えば、2 次元物質や磁気ヘテロ構造の主要な構成元素の吸収端 (3d 遷移元素 L 吸収端に加えて硫黄やリンの K 吸収端) の測定が可能となるため、顕微分光やスピン・軌道分極分光と組み合わせることで、新規 2 次元物質や 2 次元物質を含む磁気ヘテロ構造の電子・軌道状態や磁気構造の解明に効果を発揮することが期待できる。

テンダー領域の硫黄やリンの K 吸収端での測定が可能になると、バイオ系への新たな研究展開も期待できる。例えば、DNA がスピンの向きを識別するスピンフィルターの役割を持つことが報告されているが、このような生体材料のカイラリティーに関わる現象を、硫黄やリンなどの生体機能に重要な元素周辺の局所的なカイラリティーと関連させてメカニズムを解明する研究に有効である [B. Göhler, *Science* **331**, 894 (2011), R. Bentley, *Chem. Soc. Rev.* **34**, 609 (2005)]。

1-3 計測技術目標

主要な技術要素は、ダイナミクス計測・オペランド計測、ナノイメージングおよびダイナミクス計測との融合、ハイスループット計測、超高真空下 in situ 計測である。ここでは、ダイナミクス計測とナノイメージングおよびその融合について述べた後、その他の要素について記載する。

1-3-1 ダイナミクス計測、ナノイメージングおよびその融合

<ダイナミクス計測>

GHz 領域の超高速ダイナミクス計測を、X 線強磁性共鳴法 (XFMR) およびポンプ・プローブ法によって実現する。時間分解能のリングによる制約は電子バンチのパルス幅 (10–20 ps 程度) であり、その限界まで (20 GHz 程度まで) の時間分解能の計測の実現が可能である。但し、一方で、電子バンチの間隔は 2 ns (500 MHz) であり、これが本手法の時間領域の下限の目安となる (バンチモード運転は少なくとも初期段階では行われたい予定)。よって、ポンプとしては、電流パルスなどの 500 MHz 以上の高速繰返しが可能なものは実施できるが、レーザーのように高速繰返しが出来ないものは積算型計測にはなじまない。

なお、X線強磁性共鳴法 (XFMR) およびポンプ・プローブ法は繰返し積算型の計測である。

一方で、100 Hz までの高速リアルタイム計測は、分割型 APPLE-II アンジュレータの高速偏光切替によって実現する。これは、繰返し積算を要しない真のリアルタイム計測であり、PEEM を用いない XMCD, XMLD, XLD 計測として世界最速を達成する。また、外場を間引くことで電子バンチ間隔よりスローなダイナミクス測定が可能であるとともに、よりスローなダイナミクス測定にはチョッパーの利用も有効であり、1 Hz 程度から 20 GHz の広い時間スケールでのダイナミクスが実現される。また、磁気ドメインが絡む比較的にスローなダイナミクスでは、空間情報を含む XPCS による測定も効果的である。500 MHz と 100 Hz の間の領域は XPCS などによってカバーする。

<ナノイメージング>

走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM) による 10–20 nm の空間分解能のイメージングを実現する。更には、STXM 型の計測で散乱像を取得し、タイコグラフィーを行うことにより、空間分解能を 2–3 nm にまで向上させたイメージングを可能とする。このとき STXM 像をタイコグラフィーの初期値として利用することができ、高信頼度の像回復が達成できると見込まれる。また、将来的にトモグラフィーナノイメージングに展開を見込んでいる。

本 BL では、サブミクロンまでの対象を STXM でカバーする一方で、サブミクロン程度までは FZP によらないビーム集光で達成可能である。本 BL では、何れの測定においても標準的にマッピング型の計測を行うものとする。

<ダイナミクス計測とナノイメージングの融合>

蓄積リング型放射光源の限界である数 10 ps・数 nm の時間・空間の最高分解能を両立させる計測を実現する。X線強磁性共鳴法 (XFMR)、或いは、ポンプ・プローブ法と、走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM)、或いは、タイコグラフィーとを組み合わせによってこれを可能とする。XFMR やポンプ・プローブ測定の等価な時刻点 (同位相点) における積算計測を STXM やタイコグラフィーでの各計測位置で行うことにより、積算型の高速時分割イメージングを達成する。これは、実デバイスサイズ、且つ、実動作速度におけるスピンダイナミクス解明に大きく寄与する計測である。

また、分割型 APPLE-II アンジュレータの高速偏光切替を利用した 100 Hz までの高速リアルタイム計測を、CDI と組み合わせることによって、PEEM を用いない XMCD, XMLD, XLD 計測として世界最速の高速リアルタイムイメージングを実現する。これは、スキルミオン格子のダイナミクスや反強磁性磁気ドメインダイナミクスなどの研究推進に寄与する計測である。分割型 APPLE-II アンジュレータの高速偏光切替については 100 Hz を超えた周波数領域でも実現できる可能性があるため、100 Hz 超のリアルタイムイメージングの

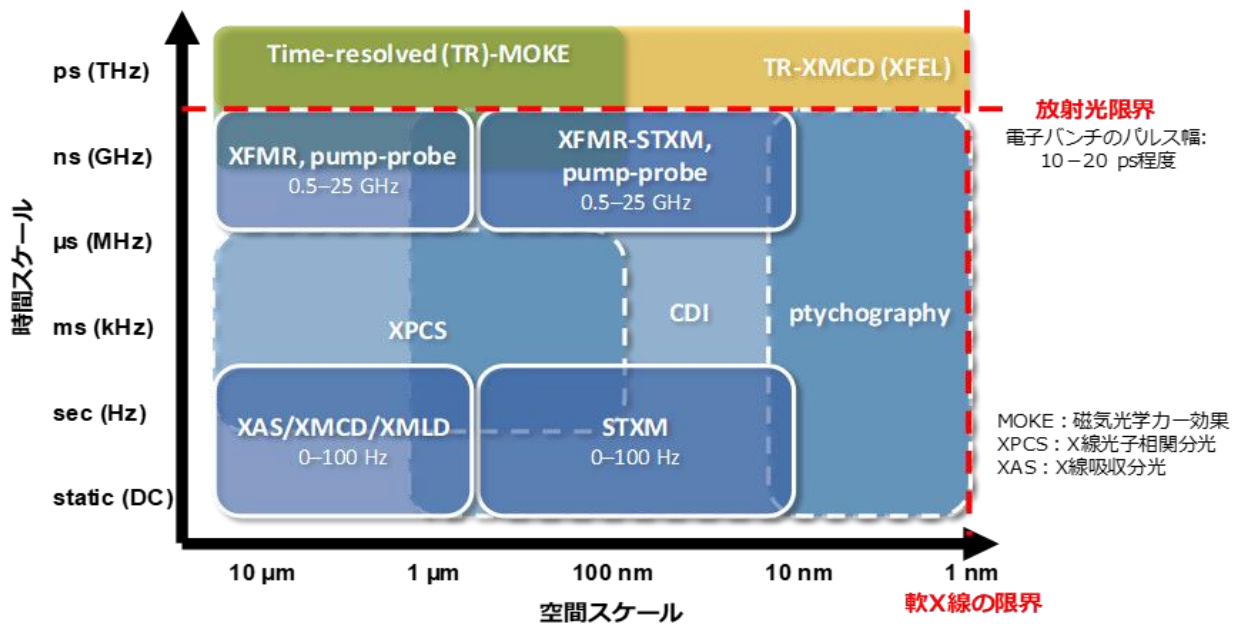


図5. 本ビームラインがカバーする時空間スケール。

実現も期待される。短い積算時間での計数の少ないコヒーレント回折パターンから像回復を行うデータ科学の技術や、軟 X 線用 2 次元検出器の性能の向上も想定すると、kHz レベルまでも視野に入れることができる。

<本 BL がカバーする時空間スケール>

蓄積リング型放射光源の限界である数 10 ps・数 nm の両立を最高分解能として、時間領域は DC から数 10 ps までを、空間スケールは数 10 μm から数 nm までをカバーする (図5)。

本 BL は、ダイナミクスの観点では、マルチレイヤー間のスピン流の伝播や nm サイズの磁気ドメインの動きなどの観察に有効である。一方、マグノン励起のような<1 ps の素過程については、XFEL などのより速いツールを相補的に利用するものとする。空間スケールでカバーする範囲は、日本の既存の施設と比べて次世代高輝度光源が効果的に利用できる領域としている。500 eV 程度のビームについて試料位置での集光時の強度を試算すると、100 μm 集光では次世代高輝度光源と SPring-8、KEK-PF の強度比はフラックス比を反映した 100:5:50 であるが、10 μm 集光では 100:5:20、1 μm 集光では 100:5:2 となり、30 nm 集光では輝度の比を反映した 100:1:1 となるように (図6)、ビームサイズが小さいほど次世代高輝度光源の威力が発揮されることが分かる。

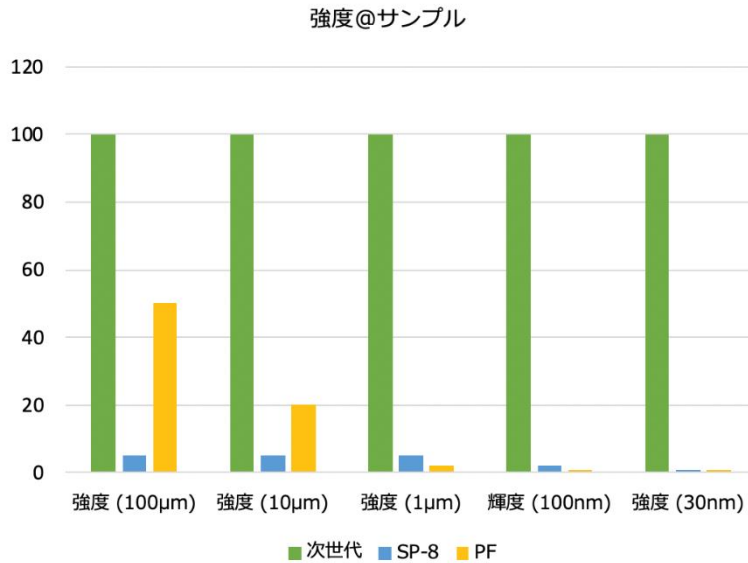


図 6. フラックス、輝度、サンプル位置での強度の比較。

1-3-2 超高真空下 in situ 計測、ハイスループット計測、オペランド計測

<ハイスループット計測>

マテリアルズインフォマティクスと融合させたマテリアル・ライブラリ（コンビナトリアル試料・不均質試料）の XMCD・XMLD・XLD 高効率測定を実現する。新規磁石材料、および、反強磁性体・ハーフメタルなど新規デバイス材料の多元素探索条件空間における創成・探索を推進、また、多様な試料に対応し、スピンオービトロニクスへの展開に寄与することが期待される。

<超高真空下 in situ 計測>

超高真空中で高品質・精密に試料作成を行い、in situ で XMCD・XMLD・XLD 計測を実現する。試料作成環境として MBE およびスパッタを整備、計測環境として、強磁場中の計測に加えて、および深さ分解計測・界面の磁気状態解析用の X 線磁気反射率・散乱計測を備えるものとする。これにより、特に、磁性トポロジカル物質や 2 次元物質、磁性合金薄膜などの新規物性・磁気特性解明の研究の推進が期待される。

<オペランド計測>

1-2-3 に記載のように分割型 APPLE-II アンジュレータの導入により超高精度オペランド計測が達成できる。

1-3-3 長期的な目標と短期的な成果、難易度等

初期段階から、コンビナトリアル試料環境や超高真空中での in situ 測定環境が整備可能であり、分割型 APPLE-II アンジュレータの磁石列を同位相として機械駆動の位相制御によって左右円偏光と水平・垂直直線偏光を切り替えるモードによる XMCD・XMLD・XLD も可能であるため、強磁性体に加えて反強磁性体及び低次元物質等の量子物質・材料に関わる新規創成・探索などの研究成果が期待される。また、XFMR 計測は偏光切替を要しないため、まず、サブミクロン程度の空間分解能を対象とした計測環境整備により、実デバイスのサイズより大きい試料を用いたスピンドイナミクス研究成果が期待される。次に、STXM と XFMR を組合せた計測手法の整備により、ナノスケールの実デバイスサイズの試料を対象とした GHz 領域でのスピンドイナミクス研究成果が期待される。

次の段階では、分割型 APPLE-II アンジュレータの立上げが完了し、フェーズシフターにより偏光制御を行うクロスアンジュレータとしての利用が可能となる。それにより、高速リアルタイム磁気イメージングや高精度なオペランド計測、マテリアル・ライブラリの高速度物性評価などによる世界最先端の研究成果が期待される。また、直線偏光を連続的に回転させる Rotational XMLD 分光も可能となり、新規分光法の開拓の成果が期待される。

さらに、次の段階では、エネルギー範囲をテnder領域にまで拡張し、世界に類を見ない同領域での XMCD や NCD など各種円二色性計測が達成される。これにより、磁性・スピントロニクス分野のみならず、バイオ系などでも非常にユニークな成果が創出されると期待される。

1-4 国内外の状況、当該ビームラインの整備で達成できる点

1-4-1 時間・空間・元素分解スピンドイナミクス計測

海外では、磁気イメージングと磁気ダイナミクスを組合わせた研究が発展しつつある。特に、STXM と XFMR などのダイナミクス手法を組合せた研究が 2015 年頃から発展している。以前から、ドイツを中心に PEEM が発展し、時分割 PEEM も進展してきたが、その後計測対象を拡大するために、STXM ベースの手法が開発されたという経緯がある。

一方、国内では、磁気イメージングは海外と同様に進展してきたが、磁気ダイナミクスは限定的である。磁気イメージングについては、PEEM に続いてナノビームイメージングや STXM の開発が進んでいる。磁気イメージングと磁気ダイナミクスを組合わせた研究については、限定的ではあるが、出始めたところである。

当該ビームラインの整備によって、国内のスピンドイナミクス研究が大いに発展することが期待される。まず、蓄積リング型放射光源の最高性能である GHz 領域・nm スケールの時間・空間スピンドイナミクス計測が可能となる。これは、国内に新規導入するもので

あり、海外のトップと比肩するレベルとなる。日本の材料・デバイス開発力と組み合わせることにより、世界トップの研究成果創出が期待される。

また、高速リアルタイム磁気イメージングが 10 msec に至る時間分解能で可能となる（繰返し積算型でないムービー型の高速測定）が、これは世界初の新技術となるものである。海外では、PEEM によって同様の時間分解能の計測が行われているが、計測対象が限定的であったものが本技術で拡張される。なお、PEEM では偏光切替時のビーム照射位置の一致精度として非常に高いものが要求されない。一方で、本技術では高い一致精度が要求されるが、分割型 APPLE-II アンジュレータの導入によって達成される。

1-4-2 XMCD から XMLD・XLD によるスピン・多極子分光への拡張による新規磁性材料・物質研究

海外では、多彩な偏光利用は標準的であり（APPLE-II 光源を利用）、XMCD に加えて XMLD、XLD を用いた研究も進展している。また、計測環境については、超高真空 in situ 計測環境の整備は進んでいる。一方で、コンビナトリアル試料を対象とした XMCD など磁気分光計測の報告例はない状況である。

国内では、円偏光利用の XMCD を用いた研究が大多数である。一方で、分割型 APPLE-II アンジュレータ（SPring-8 BL07XU）は、独創的な技術であり、この発展させたものとして本 BL を提案している。計測環境については、超高真空 in situ 計測環境での研究は海外と同等に進んでいる。また、コンビナトリアル試料を対象とした研究は海外と同様に未開拓である。

現状で、マテリアルズインフォマティクスと磁性材料分光研究との組合せは世界的に限定的である。当該ビームラインの整備によって、国内でも多彩な偏光利用が可能となる。しかも、分割型 APPLE-II アンジュレータの偏光切替によってもビーム位置変化しないという特長により、ナノスケールの空間分解能での高精度な XMCD・XMLD・XLD 計測が可能となり、微細な対象の計測が益々求められる今後にとって、世界的にもアドバンテージのある状況となる。この特長は超高真空 in situ 計測環境での研究や、本 BL で計画しているコンビナトリアル試料を対象とした研究の推進にとっても極めて有効である。また、後者と関連して、現状では世界的に限定的である磁性材料分光にマテリアルズインフォマティクスを組合せた研究が、本 BL で発展することが期待される。分割型 APPLE-II アンジュレータの導入によって、直線偏光を連続的に回転させて分光を行う Rotational MLD などの新しい分光法の構築も可能となり、世界的に未開拓の新しい測定技術が本 BL で発展することが期待される。

また、本 BL によって、テnder領域の X 線を用いた円二色性計測が世界で初めて可能となる。これにより、磁性・スピントロニクス分野だけでなく、バイオ系への新たな研究展開も期待できる。

1-5 波及効果

波及効果として以下の様な事柄が期待される。

1-5-1 時間・空間・元素分解スピンドイナミクス計測

原子レベルの界面制御により革新的性能の磁気抵抗素子が実現され、それによるデータストレージ（ハードディスクや磁気ランダムアクセスメモリ）の超高記録密度化や省エネルギー化、また磁性材料、絶縁体や量子物質からなる積層構造や異種物質間の界面を介して働く電圧トルクやスピン軌道トルクにより動作する新型磁気ランダムアクセスメモリの実現と演算素子の超高速化、省エネルギー化、小型化が期待される。

1-5-2 XMCD から XMLD・XLD によるスピン・多極子分光への拡張による新規磁性材料・物質研究

希少元素レス・フリー高性能磁石材料の実現による電気自動車用主機モーターの他、各種モーターの高効率化による省エネルギー化、小型化が実現する。同様に風力発電等に用いられる発電機の高効率化と創エネルギー性能の向上が実現する。さらに、新たな量子物質（二次元系物質等）の発見によるスピントロニクス論理集積回路の実現、トポロジースピノービットロニクスの概念に基づく新たな磁性・スピントロニクス材料や新原理のスピントロニクスデバイスの創出により、演算素子の超高速化、省エネルギー化、小型化が実現する。

1-5-3 放射光ユーザー層の拡大

本 BL は磁性・スピントロニクス材料科学の幅広い分野の研究開発ニーズに応えるために、従来の軟 X 線磁気分光測定に加え、XFMR などの磁気ダイナミクス計測、STXM を用いた顕微ダイナミクス計測など幅広い計測手法を揃えている。このような実験はこれまでのところ海外の放射光施設でのみ実施可能だった。これらの実験を国内施設で行うことができるようになり、従来からの放射光ユーザーに加えて、磁性・スピントロニクス材料科学分野の研究者が新規ユーザーとして利用することが期待できる。

2. 必要とされるエンドステーションの仕様

2-1 エンドステーションの全体の仕様、主な構成装置・機器

光源には 4 台の APPLE-II アンジュレータと 3 台のフェーズシフターからなる分割型 APPLE-II アンジュレータを採用し、左右円偏光および直線偏光を利用可能とする。偏光切替モードとして、各 APPLE-II アンジュレータの磁石列を同位相として機械駆動の位相制

御によって左右円偏光と水平・垂直直線偏光を切り替えるモード(APPLE 通常モード)と、個々のアンジュレータからの偏光を合成するモード (APPLE クロスモード) を用いる。APPLE クロスモードでは、水平直線偏光と垂直直線偏光を合成することで左右円偏光を作り出し、左右円偏光を合成することで直線偏光を作り出す。また、APPLE クロスモードでは、フェーズシフターによる最大 100 Hz 程度の偏光スイッチングを可能とする。

エネルギー範囲は磁性・スピントロニクス材料の主要構成元素である 3d 遷移金属元素 (L 吸収端)、希土類元素 (M 吸収端)、および、二次元系物質の構成元素である軽元素 (K 吸収端) をカバーする 128 – 3000 eV とする。ただし偏光モードによって利用可能なエネルギー範囲は異なる。また、エネルギー分解能は $E/\Delta E = 10000$ 程度とする。

ビームラインは 2 ブランチとし、用途の異なる実験ステーションを複数台配置することで柔軟な利用体制を実現する。ブランチ A には偏光解析装置、強磁場 in situ 計測ステーション、ハイスループット&ダイナミクス計測ステーションおよび磁気散乱・反射率測定ステーション、ブランチ B には走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM) を設置する (図 7 参照)。ブランチ A について、磁気散乱・反射率測定ステーションは移動可能な設計とし、その他の装置を接続可能とする。ブランチ B の STXM 下流側はスペースを確保し、将来的な小角散乱装置等の設置を可能とする。STXM は、温度変化の影響の低減およびナノイメージングを行う際の振動対策のためにキャビン内に収納する。近接するブランチ A のコンポーネント (2-2 に詳述) もこのキャビン内に収納する。

ビームサイズはブランチ A で $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m} \sim 1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 程度、ブランチ B ではフレネルゾーンプレート (FZP) で集光し $10\ \text{nm} \times 10\ \text{nm}$ 程度を目指す。光子フラックスは、ブランチ A で 10^{13} photons/sec/0.01 % b.w.、ブランチ B では、FZP で集光した時点で 10^{11} photons/sec/0.01 % b.w.程度とする。

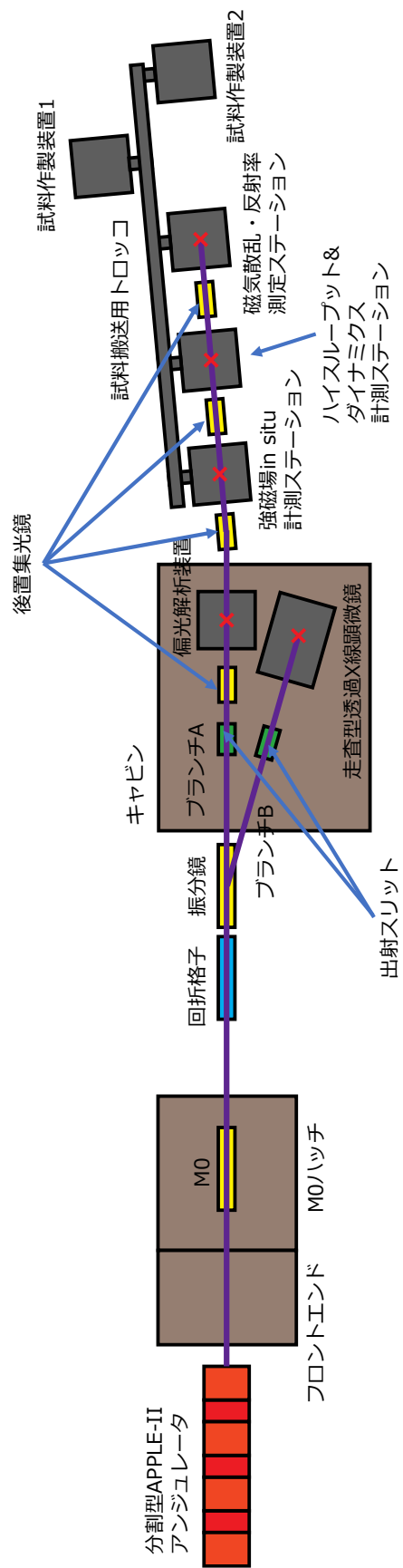


図 7. ビームライン概要とエンドステーションの配置。

2-2 光学系

図 7 のように、実験ホールに導入された放射光は、M0 ミラーでビーム発散が適切に加工され、回折格子で波長分散された後、振分ミラーでブランチ A, B が選択される。ブランチ A では出射スリットによって単色化されたビームが後置集光ミラーを経て測定装置に導入され、ブランチ B では出射スリットを通った単色の発散光がそのまま測定装置の光学素子に導入される。

M0 ミラーには長手円筒もしくは平面型ミラーを、振分ミラーには平面もしくは長手円筒型ミラーを、後置集光ミラーにはトロイダル型、或いは、K-B 型集光ミラーを用いる。なお、回折格子に収束光を照射するタイプの分光器を採用する場合には、M0 ミラーはトロイダルもしくは短手円筒型ミラーとなる。これらのミラーは、 $E < 2000$ eV 用の Au コートと $E > 2000$ eV 用の Ni コートを塗り分けたものとする。ただし、トロイダルあるいは短手円筒型のミラーを用いる場合には、塗り分けではなくコートが異なる別々のミラーを切り替える必要がある。

ブランチ A については後置集光ミラーで光路をブランチ B から遠ざける方向に振る。走査型透過 X 線顕微鏡の位置でブランチ A とブランチ B が 1 m 程度の間隔をもつものとする。また、ブランチ A の後置集光ミラーは、ブランチ上の 3 つの各測定装置の上流側直前に設置して、各試料位置上で集光できるようにする。ブランチ B については、水平方向も出射スリット位置に集光し、そこに設置したピンホール等を仮想光源として測定装置上の光学素子で試料位置に集光する。

回折格子分光器としては、 $E < 2000$ eV 用の素子と $E > 2000$ eV 用の素子 (Ni コート等) を用意する。それぞれの素子に 2 パターンの回折格子を刻むものとする。例えば、 $E < 2000$ eV 用の素子については、エネルギー範囲として 120 – 900 eV 程度、および、300 – 2000 eV 程度の 2 パターンを用意する。(BL の評価で用いる窒素の K 吸収端はどちらのパターンでも含まれるようにする。) 回折格子分光器チャンバーには素子設置用スロットを 3 箇所設け、上記 2 素子の他、高分解能化など将来的なオプションとして 1 箇所を予備として確保する。

ブランチ A の 3 つの装置の上流側には、偏光解析装置を設置する。この装置は分割型 APPLE-II アンジュレータから生成された円偏光・直線偏光の偏光方向や偏光度を定量評価するためのものである。装置はモーター制御の架台、超高真空チャンバー、チャンバー内に収納されたゴニオステージと多層膜素子などで構成される。また、偏光解析装置の直ぐ上流側にも別途、後置集光ミラーを設置し、これらとブランチ B の STXM と併せて、キャビン内に収納する。

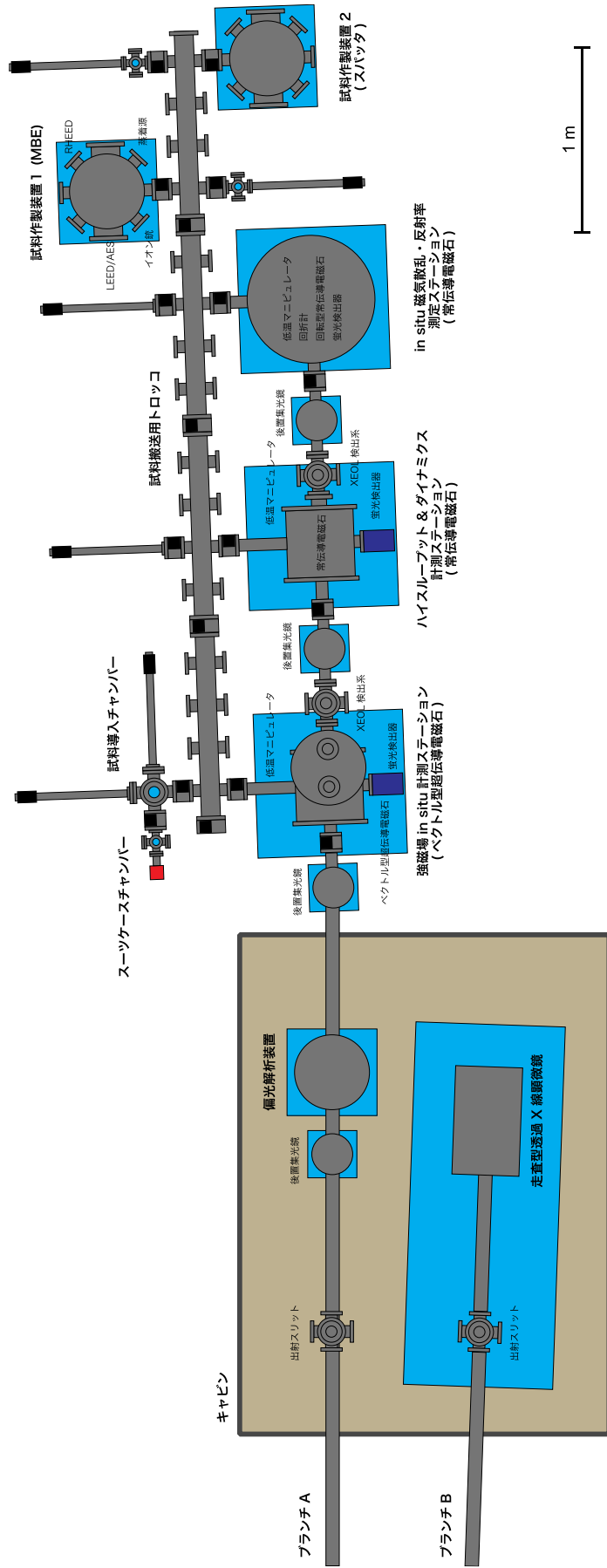


図 8. エンドステーション配置案。

表 1. ビームライン諸元。

光源	分割型 APPLE-II アンジュレータ (I. Matsuda <i>et al.</i> , eJSSNT 17, 41 (2019))
偏光	左右円偏光および垂直・水平直線偏光 (DC~100 Hz 偏光切替)
エネルギー 範囲	APPLE 通常モード: 178–1200 eV (左右円偏光), 128–3000 eV (水平直線偏光), 226–3000 eV (垂直直線偏光)
	APPLE クロスモード: 226–3000 eV (左右円偏光), 178–1200 eV (直線偏光)
エネルギー 分解能	$E/\Delta E = 10000$
フラックス	ブランチ A 10^{13} photons/sec/0.01 % b.w.
	ブランチ B (FZP 集光後) 10^{11} photons/sec/0.01 % b.w.
ビームサイズ	ブランチ A $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}, 1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$
	ブランチ B (FZP 集光後) $10\ \text{nm} \times 10\ \text{nm}$

2-3 エンドステーション

2-3-1 強磁場 in situ 計測ステーション (ブランチ A)

強磁場 in situ 計測ステーションでは、次世代の磁性・スピントロニクス材料へ向けたグラフェンなどの二次元物質、トポロジカル絶縁体、コンビナトリアル試料など薄膜・多層膜試料の超高真空中その場成膜と磁気分光測定を行う。XAS/XMCD 測定チャンバーの外部磁場環境にはベクトル型超伝導電磁石を採用し、単原子積層膜や磁性トポロジカル物質などの高磁場・低温測定に対応する。

ベクトル型超伝導電磁石による磁場の方向は、ビーム平行方向に 6–9 T、ビーム垂直方向に 2–4 T 程度とする。ビーム平行方向への高磁場印加環境は、試料角度依存 XMCD 測定による磁気異方性の精密解析や磁性トポロジカル物質、磁性ナノ構造など飽和磁場の大きな物質の測定のために必須である。また、ビーム垂直方向の磁場は XMLD 測定のために必須である。ビーム垂直方向に印加可能な磁場の大きさは、超伝導コイルの設計に依存するが、2–4 T 以上であることが望ましい。ビーム垂直方向の磁場の向きは、水平、或いは、上下方向であるが、漏洩磁場が蓄積リングの電子軌道に影響を与える可能性のある場合は、その影響を低減できる上下方向を選択するなどの留意が必要である。

真空度は 10^{-8} – 10^{-9} Pa 程度とし、試料表面の清浄状態を保った測定を可能とする。試料作製装置には、厚さや組成を精密に制御した超薄膜、多層膜や二次元物質の成膜に適した分子線エピタキシー (MBE) 装置、及び、多元素からなる合金や化合物の薄膜の成膜に適

したマグネトロンスパッタリング装置の2種類の成膜装置を設置し、用途によって使い分ける。これらを複合的に利用することにより、グラフェン/ホイスラー合金のような二次元物質と多元合金の界面を作成し in situ 計測することも可能となる。また、スーツケースチャンバーを用いて、他所で作成した試料を超高真空環境で保持したまま運搬し、本装置へ導入することを可能とする。

<機器構成> 強磁場 in situ 計測チャンバー (ベクトル型超伝導電磁石 (液体 He 冷却または He 循環型冷凍機による冷却)、低温試料マニピュレータ、可視光検出器、軟 X 線検出器)、スーツケースチャンバー、試料導入チャンバー、試料搬送システム、試料作成装置 1 (MBE 装置: 高温試料マニピュレータ、電子ビーム蒸着源、分子線蒸着源、反射高速電子線回折装置 (RHEED)、オージェ電子分光装置、低速電子線回折 (LEED) 装置、アルゴンイオン銃)、試料作成装置 2 (マグネトロンスパッタリング装置: 高温試料マニピュレータ、マグネトロンスパッタ源、RHEED)

<温度、磁場などスペック> 磁場: 光軸方向 6-9 T、光軸垂直方向 2-4 T、温度: 数~300 K

2-3-2 ハイスループット&ダイナミクス計測ステーション (ブランチ A)

ハイスループット&ダイナミクス計測ステーションでは、磁性・スピントロニクス材料およびデバイスの解析を行う。コンビナトリアル成膜試料などのマテリアル・ライブラリのハイスループット計測や電場・電流印加等のオペランド計測、XFMR などの高速ダイナミクス計測を行うことのできる汎用性の高い磁気分光ステーションとする。外部磁場環境としては、常伝導電磁石を採用する。ハイスループット計測やオペランド計測のために試料空間の自由度を高める設計とし、磁場の大きさは 2 T 程度 (電磁石ヨーク鉄の飽和磁化程度) とする。真空度は 10^{-8} - 10^{-9} Pa 程度とし、試料表面の清浄状態を保った測定を可能とする。 piezo 素子による試料位置の精密制御によってマテリアル・ライブラリのハイスループット計測に対応する。また、これによって試料交換やオペランド計測のための試料の取り扱いが容易になる。XFMR 測定のために必要な高周波計測機器も取り揃える。放射光マスタークロックから整数倍波を生成するためのコムジェネレータや高周波を生成するためのベクトルネットワークアナライザ、解析するためのオシロスコープなどを備える。また、強磁場 in situ 計測ステーションと同様に、試料作成装置で作成した試料を in situ で測定することにも対応する。

<機器構成> ハイスループット&ダイナミクス計測チャンバー (常伝導電磁石 (水冷)、低温試料マニピュレータ、可視光検出器、軟 X 線検出器 (、試料導入チャンバー、XFMR 用エレクトロニクス (ベクトルネットワークアナライザ、オシロスコープ、コムジェネレータ、ファンクションジェネレータ、ロックインアンプ、パワーメータ)

<温度、磁場などスペック> 磁場：光軸方向 2 T、温度：数~300 K

2-3-3 in situ 磁気散乱・反射率測定ステーション (ブランチ A)

磁気散乱・反射率測定装置では、薄膜・多層膜試料の深さ方向磁気状態を解析するための磁気散乱・反射率測定を行う。低温試料マニピュレータで薄膜試料をビーム方向に対して回転できるようにする。これとは独立して回転可能な常伝導電磁石を設置する。試料方位と磁場方向のビーム軸に対する自由度を確保し、散乱測定及び反射率測定を可能とする。散乱・反射軟 X 線を検出するための軟 X 線検出器についても、試料周りを回転可能なステージ上に設置する。

<機器構成> 磁気散乱・反射率測定チャンバー(常伝導電磁石、低温試料マニピュレータ、軟 X 線検出器)

<温度、磁場などスペック> 磁場：1 T、温度：数~300 K

2-3-4 走査型透過 X 線顕微鏡 (ブランチ B)

走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM) では、ナノ集光ビームを用いた磁性・スピントロニクスデバイスの顕微解析を行う。STXM は WG メンバーの武市氏が KEK フォトンファクトリーで開発したシステムを基本とし、外部磁場環境やオペランド計測環境を付与する。STXM は光学定盤に真空チャンバーを設置し、その中に光学系を組み上げる。フレネルゾーンプレートなどの集光素子や試料は piezo モーター駆動による粗動・微動ステージを用いて位置制御する。精密な位置制御のためにレーザー干渉計を用いる。真空度は He 雰囲気 10^4 Pa 程度から超高真空まで対応する。試料冷却のためのクライオスタットを導入し、20 K 程度まで冷却可能とする。永久磁石磁気回路を用いて 0.5 T 程度の面内ベクトル磁場印加を可能とする。通常の STXM 向けセットアップに加えて、タイコグラフィやコヒーレント回折イメージングを行うために二次元検出器を導入する。ダイナミクス計測とナノイメージングの融合した計測を実現するために、XFMR 測定と組み合わせた計測も実施できる仕様とする。但し、高周波計測機器などのエレクトロニクスは、ハイスループット & ダイナミクス計測ステーションと共通のものを使用する。

<機器構成> 走査型透過 X 線顕微鏡 (光学定盤、真空チャンバー、真空ポンプ、粗動・微動ステージ、レーザー干渉計、フレネルゾーンプレート)

<温度、磁場などスペック> 磁場：磁場印加可能、温度：20~300 K

3. その他

必要とされる光源、光学系及び検出器系の仕様、その他特別な要望等があれば

- 偏光可変かつ高速偏光切替の可能な挿入光源 (APPLE-II アンジュレータベースの分割型 APPLE-II アンジュレータ) が必須である。
- 走査型透過 X 線顕微鏡 (ナノイメージング) におけるタイコグラフィ、コヒーレント回折イメージング用の 2 次元検出器は、データ入出力の高速性と広いダイナミックレンジのスペックのものを要する。
- 走査型透過 X 線顕微鏡 (ナノイメージング) で用いる軟 X 線用フレネルゾーンプレートは高額な消耗品であるため、継続的な維持費を要する。
- 走査型透過 X 線顕微鏡で高空間分解能を達成するには温度管理されたキャビン内に設置することが必要である。

想定されるデータサイズや希望するデータマネジメントについて

- 実験データサイズは、一般的な XMCD・XMLD 等のスペクトル測定で 500 MB/日、スペクトルのハイスループット計測で 1 GB/日、STXM で 30 GB/日、タイコグラフィ、コヒーレント回折イメージングで 10 TB/日程度と想定される。
- データマネジメントの方針として、試料情報や測定条件などのメタデータと計測データを対応させた管理や、これらを全てクラウド上の高速データベースに保存し利用可能とすることが必要である。
- タイコグラフィの再構成計算などの処理には高速計算機 (GPU 搭載のワークステーションもしくは HPC サーバ) を必要とする。これらもクラウド上で行えるような環境が望ましい。

建屋の環境 (振動対策、温度・湿度制御、等)・インフラ (電気系統、LAN、圧空等) について

- ハイスループット計測などのマイクロビームによる走査型測定やナノイメージングのために振動対策を要する。振動対策の一環として、走査型透過 X 線顕微鏡は温度管理されたキャビン内に設置する。インフラとして電気系統、LAN、圧空は必須である。寒剤として液体窒素、液体ヘリウムが必要である。

エンドステーションの整備や運転・管理等への特別な配慮 (スキル、人数等) の必要性について

- 各エンドステーションにつきビームラインサイエンティスト 1 名、ポスドク 1 名が最低限必要である。分割型 APPLE-II アンジュレータの整備・運用、データ解析ソフトウェアの開発、データベースの管理運用に専門のテクニシャンが必要である。

- オフライン機器として、STXM 用試料を加工するための微細加工装置（収束イオンビーム加工装置）、粗加工装置（アイソメット、TXP など）が必要である。また試料調整のために光学顕微鏡、放射光測定前後の試料評価のためにエネルギー分散型 X 線分光付き走査型電子顕微鏡、原子間力顕微鏡、試料振動型磁束計等を要する。

その他、自由記載

BL 名称案として下記を提案する。

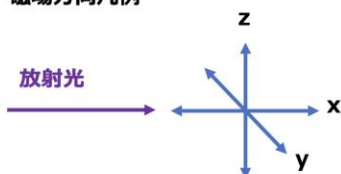
1. 磁性・スピントロニクス材料科学
2. 軟 X 線顕微磁気ダイナミクス
3. 軟 X 線顕微磁気分光

参考として表 2 に国内外でベクトル型超伝導電磁石が導入されている軟 X 線ビームラインのリストを示す。

表 2. 国内外でベクトル型超伝導電磁石が導入されているビームライン。

BL	国	エンドステーション構成	磁場 (x,y,z) (T)	磁場掃引速度 (x,y,z) (T/min)
SOLEIL DEIMOS	フランス	<ul style="list-style-type: none"> ベクトル型超伝導電磁石 常伝導電磁石 (1 T, 10Hz) 	7, 2, 0	
SLS X-Treme	スイス	<ul style="list-style-type: none"> ベクトル型超伝導電磁石 	7, 2, 0	2, 0.36, 0
ESRF ID32	EU	<ul style="list-style-type: none"> ベクトル型超伝導電磁石 	9, 4, 0	8, 2, 0
ALBA BOREAS	スペイン	<ul style="list-style-type: none"> ベクトル型超伝導電磁石 常伝導電磁石 (2 T, 磁気散乱用) 	6, 2, 2	2, 0.6, 0.6
BESSY-II PM2	ドイツ	<ul style="list-style-type: none"> ベクトル型超伝導電磁石 	9, 2, 1 2 (horizontal) 1 (any direction)	
ALS BL4.0.2	アメリカ	<ul style="list-style-type: none"> Endstation Vector Magnet Endstation Resonant X-Ray Scattering Endstation Superconducting Vector Magnet Endstation X-ray detected ferromagnetic resonance (XFMR) 	4 (any direction)	
PF BL-16A	日本	<ul style="list-style-type: none"> 超伝導電磁石 (5 T) 常伝導電磁石 (1.2 T) ベクトル型超伝導電磁石 	1 T (horizontal) ?	

磁場方向凡例



以上